ISNN 3030-3907

2026
JUNE
ISSUE - 6
VOLUME -6

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

IYUN 2026
Issue - 6, VOLUME – 6

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

UDK 538.911, 935, 958, 975

YUKLAMA PROGNOZI ASOSIDA ELEKTR ENERGETIKA TIZIMLARIDA CHASTOTA BO‘YICHA AVTOMATIK ORTIQCHA YUKLAMADAN HIMOYA QILISHNING ISHLAMAY QOLISH XAVFINI PROGNOZLASH

Xoliddinov Ilhomjon Xosiljonovich
Farg‘ona Davlat Texnika Universiteti , “Energetika muhandisligi” fakulteti “Elektr energetikasi” kafedrasi mudiri DSc. dots.
Botiraliyev Yahyobek Akmaljon o‘g‘li
Farg‘ona Davlat Texnika Universiteti , “Energetika muhandisligi” fakulteti, Elektr ta’minoti (tarmoqlar bo‘yicha) yo‘nalishi magistranti
E-mail: yahyobekbotiraliyev@gmail.com
ORCID: 0009-0007-8814-6117
Mahammadjonov Sodirjon Nurmuhammad o‘g‘li
Farg‘ona Davlat Texnika Universiteti , “Energetika muhandisligi” fakulteti, Elektr ta’minoti (tarmoqlar bo‘yicha) yo‘nalishi magistranti
E-mail: muhammadjonovsodirjon03@gmail.com
ORCID: 0009-0005-4004-5742

Аннотация. В данной статье исследуется вопрос предварительного определения риска срабатывания системы автоматического регулирования частоты и нагрузки (АЧР) в электроэнергетических системах на основе прогнозирования нагрузки. Стабильная работа электроэнергетической системы зависит от баланса мощности между генерацией и потреблением, а нарушение данного баланса приводит к отклонению частоты системы. В исследовании динамика нагрузки рассматривается как основной фактор, влияющий на изменение частоты, а для прогнозирования частотных отклонений применяются методы прогнозирования нагрузки. Временные ряды нагрузки были разделены на трендовую, сезонную и случайную составляющие, после чего прогнозирование осуществлялось с использованием модели LSTM на основе искусственного интеллекта. На основе полученных прогнозных значений была рассчитана частота системы с помощью математической модели и выполнено сравнение с критическими пределами частоты. Результаты исследования показали, что предложенная модель позволяет заранее определять опасные режимы работы системы и снижать вероятность срабатывания АЧР. Кроме того, точность модели была оценена с использованием статистических показателей MAE, RMSE, MAPE и коэффициента детерминации. Предложенная методология является эффективным инструментом для проактивного управления энергосистемой,

предотвращения аварийных ситуаций и повышения надежности электроснабжения.

Ключевые слова: АЧР, стабильность частоты, прогнозирование нагрузки, электроэнергетическая система, искусственный интеллект, модель LSTM, машинное обучение, баланс мощности, автоматическое управление, энергосистема, отклонение частоты, динамика нагрузки, мощность генерации, модель прогнозирования, smart grid, энергетическая безопасность, электроснабжение, математическое моделирование, статистический анализ, RMSE, MAE, MAPE, коэффициент детерминации, временные ряды, энергоэффективность, аварийный режим, проактивное управление, электрическая нагрузка, контроль частоты, энергетическая автоматика.

Annotatsiya. Mazkur maqolada elektr energetika tizimlarida avtomatik chastota yuklamani rostlash (ACHR) tizimining ishga tushish xavfini yuklama prognozi asosida oldindan aniqlash masalasi tadqiq etilgan. Elektr energetika tizimining barqaror ishlashi generatsiya va iste'mol o'rtasidagi quvvat muvozanatiga bog'liq bo'lib, ushbu muvozanatning buzilishi tizim chastotasining og'ishiga olib keladi. Tadqiqotda tizim chastotasining o'zgarishiga asosiy ta'sir etuvchi omil sifatida yuklama dinamikasi qaralgan va yuklama prognozlash usullari yordamida chastota og'ishlarini oldindan baholash imkoniyatlari o'rganilgan. Yuklama vaqt qatorlari trend, mavsumiy va tasodifiy komponentlarga ajratilib, LSTM asosidagi sun'iy intellekt modeli yordamida prognoz qilingan. Olingan prognoz qiymatlar asosida tizim chastotasi matematik model yordamida hisoblab chiqilgan hamda kritik chastota chegaralari bilan taqqoslangan. Tadqiqot natijalariga ko'ra, yuklama prognozlash modeli yuqori aniqlik bilan ishlagan va chastota og'ishlarini oldindan aniqlash imkonini bergan. Shuningdek, MAE, RMSE, MAPE va determinatsiya koeffitsienti yordamida modelning statistik aniqligi baholangan. Taklif etilgan metodologiya energotizimni proaktiv boshqarish, avariyaviy holatlarning oldini olish hamda elektr ta'minoti ishonchliligini oshirish uchun samarali yondashuv ekanligi aniqlandi.

Kalit so'zlar: ACHR, chastota barqarorligi, yuklama prognozi, elektr energetika tizimi, sun'iy intellekt, LSTM modeli, mashinaviy o'rganish, quvvat balansi, avtomatik boshqaruv, energotizim, chastota og'ishi, yuklama dinamikasi, generatsiya quvvati, prognozlash modeli, smart grid, energetika xavfsizligi, energiya ta'minoti, matematik modellashtirish, statistik tahlil, RMSE, MAE, MAPE, determinatsiya koeffitsienti, vaqt qatorlari, energiya samaradorligi, avariyaviy holat, proaktiv boshqaruv, elektr yuklamasi, chastota nazorati, energetika avtomatikasi.

Abstract. This article investigates the issue of predicting the risk of activation of the automatic frequency load shedding (AFLS) system in electric power systems

ISSN 3030-3907

based on load forecasting. The stable operation of a power system depends on the balance between power generation and consumption, while imbalance leads to deviations in system frequency. In this study, load dynamics are considered the main factor affecting frequency changes, and load forecasting methods are used to predict frequency deviations in advance. Load time series were divided into trend, seasonal, and random components, and forecasting was carried out using an LSTM model based on artificial intelligence. Based on the obtained forecast values, the system frequency was calculated using a mathematical model and compared with critical frequency limits. The research results showed that the proposed model makes it possible to identify dangerous operating conditions in advance and reduce the probability of AFLS activation. In addition, the accuracy of the model was evaluated using statistical indicators such as MAE, RMSE, MAPE, and the coefficient of determination. The proposed methodology serves as an effective tool for proactive power system management, prevention of аварийных situations, and improvement of power supply reliability.

Keywords: AFU, frequency stability, load forecasting, electric power system, artificial intelligence, LSTM model, machine learning, power balance, automatic control, power system, frequency deviation, load dynamics, generation power, forecasting model, smart grid, energy security, power supply, mathematical modeling, statistical analysis, RMSE, MAE, MAPE, coefficient of determination, time series, energy efficiency, emergency condition, proactive control, electrical load, frequency monitoring, power system automation.

1.KIRISH.

Bugungi kunda elektr energetika tizimlari zamonaviy infratuzilmaning eng muhim tarkibiy qismlaridan biri hisoblanadi. Sanoat korxonalari, transport tizimlari, aloqa vositalari va axborot texnologiyalarining uzluksiz ishlashi elektr energiyasi ta’minotining ishonchliligiga bevosita bog‘liqdir. Elektr energiyasi iste’molining ortib borishi hamda energetika tizimlarining murakkablashuvi tizim barqarorligini ta’minlash masalasini dolzarb ilmiy yo‘nalishlardan biriga aylantirmoqda. Ayniqsa, elektr ta’minoti tizimda chastotasining nominal qiymatdan og‘ishi katta texnik va iqtisodiy yo‘qotishlarga sabab bo‘lishi mumkin. [1]

Elektr energetika tizimida chastota generatsiya va iste’mol o‘rtasidagi quvvat balansining asosiy ko‘rsatkichi hisoblanadi. Agar ishlab chiqarilayotgan quvvat iste’mol qilinayotgan quvvatga teng bo‘lsa, chastota nominal qiymatda saqlanadi. Yuklama ortishi yoki generatsiyaning kamayishi natijasida tizimda quvvat tanqisligi yuzaga keladi va chastota pasayadi. Aksincha, generatsiya ortiqcha bo‘lgan holatda chastota oshadi. Shu sababli chastota barqarorligini saqlash energotizimni boshqarishning asosiy vazifalaridan biridir. [2]

ISSN 3030-3907

Energotizimlarda chastota barqarorligini ta’minlash uchun turli avtomatik boshqaruv va himoya tizimlari qo‘llaniladi. Shulardan biri avtomatik chastota yuklamani rostlash tizimi — ACHR hisoblanadi. ACHR tizimi chastota kritik qiymatdan pastga tushgan holatda tizimdagi ayrim yuklamalarni avtomatik ravishda uzib qo‘yadi va shu orqali energotizimni avariyaviy holatdan saqlab qoladi. Biroq ushbu tizimning ishga tushishi elektr energiyasi uzilishlariga sabab bo‘ladi va iste’molchilarga iqtisodiy zarar yetkazishi mumkin. [3]

An’anaviy energetika tizimlarida chastota nazorati asosan reaktiv boshqaruv tamoyiliga asoslanadi. Bunda tizim chastotasi kritik qiymatdan pasaygandan keyingina avtomatik himoya vositalari ishga tushadi. Zamonaviy energetika tizimlarida esa proaktiv boshqaruv konsepsiyasi muhim ahamiyat kasb etmoqda. Ushbu yondashuv tizimdagi xavfli holatlarni oldindan aniqlash va ularning oldini olishga asoslanadi. Proaktiv boshqaruvni amalga oshirish uchun yuklama prognozi va sun’iy intellekt texnologiyalaridan foydalanish zarur hisoblanadi. [4]

Yuklama prognozi elektr energetika tizimlarini boshqarishning muhim tarkibiy qismlaridan biridir. Elektr yuklamasi kun davomida, fasllar bo‘yicha va iste’molchilarning faoliyatiga qarab o‘zgarib turadi. Yuklama o‘zgarishlarini oldindan aniqlash generatsiya quvvatlarini optimal boshqarish, energiya resurslaridan samarali foydalanish hamda tizim chastotasining barqarorligini saqlash imkonini beradi. Shu sababli yuklama prognozlash masalalari energetika sohasidagi ilmiy tadqiqotlarning asosiy yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. [5]

So‘nggi yillarda yuklama prognozlashda sun’iy intellekt va mashinaviy o‘rganish usullaridan keng foydalanilmoqda. Xususan, sun’iy neyron tarmoqlar, regressiya algoritmlari, vaqt qatorlari tahlili va LSTM modellari elektr yuklamasining kelajakdagi qiymatlarini yuqori aniqlik bilan prognozlash imkonini bermoqda. LSTM modeli vaqt bo‘yicha bog‘liq ma’lumotlarni qayta ishlashda samarali hisoblanadi va energotizim yuklamasining murakkab dinamikasini aniqlash imkonini beradi. [6]

Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi elektr energetika tizimlarida ACHR ishga tushish xavfini yuklama prognozi asosida oldindan aniqlash metodologiyasini ishlab chiqishdan iborat. Tadqiqot davomida yuklama prognozlash uchun LSTM modeli qo‘llanildi, energotizim chastotasining matematik modeli ishlab chiqildi hamda prognoz qilingan yuklama va generatsiya qiymatlari asosida tizim chastotasi baholandi. Bundan tashqari, chastota kritik qiymatlarga yaqinlashgan holatlarda xavfni aniqlash mezonlari ishlab chiqildi. [7]

Taklif etilgan metodologiya energotizimni proaktiv boshqarish imkonini beradi hamda tizimda yuzaga kelishi mumkin bo‘lgan avariyaviy holatlarni oldindan aniqlashga xizmat qiladi. Ushbu yondashuv elektr energetika tizimlarining barqarorligi va ishonchliligini oshirish, elektr uzilishlarini

ISSN 3030-3907

kamaytirish, energiya samaradorligini ta’minlashda muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega hisoblanadi. Kelgusida mazkur metodologiyani real energetika obyektlarida qo‘llash va yanada takomillashtirish istiqbolli ilmiy yo‘nalishlardan biri bo‘lib qoladi. [8]

2.METODOLOGIYA. Mazkur tadqiqotda elektr energetika tizimida chastota barqarorligini ta’minlash masalasi kompleks, ko‘p bosqichli yondashuv asosida ko‘rib chiqiladi. Taklif etilayotgan metodologiya tizimdagi quvvat muvozanatini prognozlash, chastota dinamikasini modellashtirish, xavf holatlarini aniqlash hamda avtomatik boshqaruv qarorlarini ishlab chiqishni o‘z ichiga oladi. Ushbu yondashuv ayniqsa qayta tiklanuvchi energiya manbalari ulushi ortib borayotgan sharoitda energotizimning turg‘unligini ta’minlash uchun muhim ahamiyatga ega.[9-10]

2.1.Chastota dinamikasining matematik modeli

Elektr energetika tizimida chastota o‘zgarishi generatsiya va yuklama o‘rtasidagi quvvat nomutanosibligi bilan bevosita bog‘liq bo‘lib, tizimning umumiy energetik holatini ifodalovchi asosiy parametrlaridan biri hisoblanadi. Energotizimda ishlab chiqarilayotgan elektr quvvati bilan iste’mol qilinayotgan quvvat o‘rtasida muvozanat buzilgan holatlarda tizim chastotasining o‘zgarishi kuzatiladi. Agar generatsiya quvvati iste’mol yuklamasidan ortiq bo‘lsa, tizim chastotasi oshadi, aksincha, yuklama generatsiyadan katta bo‘lgan holatlarda esa chastota pasayadi. Shu sababli chastota energetika tizimining dinamik barqarorligini tavsiflovchi muhim ko‘rsatkichlardan biri sifatida qaraladi. [11]

Energotizimning dinamik xatti-harakati hamda chastotaning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi quyidagi differensial tenglama orqali ifodalanadi:

$$\frac{2H}{f_0}\frac{df}{dt} = P_{gen}(t) - P_{load}(t) - D\Delta f(t) \qquad (1)$$

Mazkur matematik model energotizimning fizik va dinamik xususiyatlarini tavsiflashda fundamental ahamiyat kasb etadi. Tenglama orqali tizimda yuzaga keladigan chastota tebranishlari, quvvat balansidagi o‘zgarishlar hamda tizimning ushbu o‘zgarishlarga nisbatan reaksiyasi aniqlanadi. Shuningdek, ushbu model energotizimning vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan rejimlarini tahlil qilish va chastota barqarorligini baholash imkonini beradi.

Bu yerda: H-tizim inertsiya konstantasi bo‘lib, generatorlarning aylanuvchi massalari hisobiga hosil bo‘ladigan kinetik energiyani ifodalaydi hamda tizimning chastota o‘zgarishlariga qarshilik ko‘rsatish qobiliyatini tavsiflaydi; f_0-nominal chastota qiymati bo‘lib, energetika tizimining normal ish rejimidagi standart chastotasini bildiradi ($50\,Hz$); $P_{gen}(t)$-vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchi generatsiya quvvati bo‘lib, elektr stansiyalar tomonidan ishlab chiqarilayotgan umumiy elektr energiyasi quvvatini ifodalaydi; $P_{load}(t)$-tizim yuklamasi bo‘lib, iste’molchilar

ISSN 3030-3907

tomonidan talab qilinayotgan umumiy elektr quvvatini tavsiflaydi; D-damping koeffitsienti bo‘lib, tizimning chastota og‘ishlariga nisbatan tabiiy va boshqaruv asosidagi so‘nish xususiyatlarini ifodalaydi; $\Delta f(t)$-nominal qiymatga nisbatan chastota og‘ishini ko‘rsatadi.

Mazkur model tizimning dinamik holatini matematik jihatdan ifodalash imkonini berib, energotizimning barqaror ishlash rejimini tahlil qilishda muhim vosita hisoblanadi. Ayniqsa, elektr yuklamalarining keskin o‘zgarishi, generatsiya quvvatidagi nomutanosibliklar yoki avariyaviy holatlarda tizim chastotasining qanday o‘zgarishini aniqlashda ushbu tenglama keng qo‘llaniladi.Shu bilan birga, model yordamida energotizimning kichik va katta buzilishlarga bo‘lgan javob reaksiyasi baholanadi hamda chastota barqarorligini saqlash uchun zarur boshqaruv choralarini ishlab chiqish imkoniyati yaratiladi. Shu sababli ushbu matematik model zamonaviy elektr energetika tizimlarida chastota nazorati, avtomatik boshqaruv algoritmlarini ishlab chiqish va tizim turg‘unligini ta’minlash bo‘yicha tadqiqotlarning asosiy nazariy poydevorlaridan biri hisoblanadi.[12]

2.2.Soddalashtirilgan chastota modeli

Amaliy hisoblashlarda va real vaqt rejimida tezkor baholash jarayonlarini amalga oshirishda energotizimning to‘liq differensial modelidan foydalanish ayrim hollarda murakkablik tug‘dirishi mumkin. Shu sababli chastota o‘zgarishini operativ tarzda aniqlash va tizim holatini tezkor baholash maqsadida soddalashtirilgan matematik model qo‘llaniladi. Ushbu model energotizimdagi quvvat nomutanosibligi va chastota og‘ishi o‘rtasidagi bog‘liqlikni soddalashtirilgan ko‘rinishda ifodalash imkonini beradi.

Mazkur soddalashtirilgan model quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$\Delta f(t) \approx \frac{\Delta P_{load}(t)}{K_s} \qquad (2)$$

Ushbu matematik ifoda tizimdagi yuklama o‘zgarishi natijasida yuzaga keladigan chastota og‘ishini baholash uchun qo‘llaniladi. Modelning asosiy afzalligi uning soddaligi va hisoblash tezligida bo‘lib, bu real vaqt boshqaruv tizimlarida muhim ahamiyat kasb etadi. Ayniqsa, operativ boshqaruv, monitoring va avtomatik himoya algoritmlarida ushbu modeldan samarali foydalanish mumkin.

Bu yerda: $\Delta f(t)$ — vaqt bo‘yicha yuzaga keladigan chastota og‘ishini ifodalaydi hamda tizim chastotasining nominal qiymatdan qanchalik farq qilayotganini ko‘rsatadi; $\Delta P_{load}(t)$ — yuklama quvvatining o‘zgarishi bo‘lib, iste’molchilar tomonidan talab qilinayotgan elektr quvvatidagi ortish yoki kamayishni tavsiflaydi; K_s — tizimning chastotaga sezgirlik koeffitsienti bo‘lib, inertsiya va regulyatsiya xususiyatlarini umumlashtiradi hamda tizimning yuklama o‘zgarishlariga bo‘lgan sezgirligini ifodalaydi.

ISSN 3030-3907

Ushbu model yordamida energotizimda yuzaga keladigan chastota og‘ishlarini tezkor ravishda aniqlash va baholash imkoniyati yaratiladi. Shuningdek, model operativ hisoblashlarda tizimning dinamik holatini soddalashtirilgan ko‘rinishda ifodalab beradi. Ushbu yondashuv ayniqsa chastota nazorati, avariyaviy holatlarni aniqlash va avtomatik boshqaruv algoritmlarini ishlab chiqishda muhim ahamiyatga ega. Soddalashtirilgan model real vaqt rejimida ishlovchi aqlli boshqaruv tizimlari uchun qulay matematik asos bo‘lib xizmat qiladi. Ushbu model yordamida chastota o‘zgarishlari va yuklama nomutanosibliklari o‘rtasidagi bog‘liqlikni tezkor tahlil qilish hamda tizim barqarorligini baholash imkoniyati kengayadi. Shu sababli mazkur model elektr energetika tizimlarida chastota monitoringi va operativ boshqaruv jarayonlarida keng qo‘llaniladigan muhim matematik vositalardan biri hisoblanadi.[13-15]

2.3. Yuklama modelini shakllantirish.

Elektr energiyasi iste’moli turli texnologik, ijtimoiy va ekspluatatsion omillar ta’sirida shakllanadi hamda o‘zining dinamik xususiyatiga ega bo‘ladi. Shu sababli energotizim yuklamasini matematik jihatdan tavsiflashda uni alohida komponentlarga ajratib tahlil qilish muhim ahamiyat kasb etadi. Mazkur yondashuv yuklama tarkibini chuqurroq o‘rganish, uning vaqt bo‘yicha o‘zgarish qonuniyatlarini aniqlash hamda prognozlash aniqligini oshirish imkonini beradi.

Elektr tarmoq yuklamasi deterministik va tasodifiy komponentlardan tashkil topgan bo‘lib, quyidagi matematik model orqali ifodalanadi:

$$P_{load}(t) = P_{trend}(t) + P_{season}(t) + P_{stochasti}\ (t) \qquad (3)$$

Bu matematik ifoda yuklama dinamikasining asosiy tarkibiy qismlarini tavsiflaydi hamda elektr energiyasi iste’molining vaqt bo‘yicha shakllanishini tizimli ravishda ifodalash imkonini beradi. Model yuklama o‘zgarishini alohida komponentlar kesimida ko‘rib chiqishga asoslangan bo‘lib, bu energotizim rejimlarini tahlil qilishda muhim ahamiyatga ega.

Bu yerda:$P_{trend}(t)$ — uzoq muddatli trend komponenti bo‘lib, yuklamaning umumiy o‘sish yoki kamayish tendensiyasini ifodalaydi. Ushbu komponent energiya iste’molining vaqt davomida shakllanadigan asosiy yo‘nalishini tavsiflaydi hamda yuklama dinamikasining barqaror o‘zgarish qismini aks ettiradi; $P_{season}(t)$ -mavsumiy komponent bo‘lib, yuklamaning ma’lum davriylik asosida takrorlanib turadigan o‘zgarishlarini ifodalaydi. Ushbu komponent kunlik, haftalik yoki mavsumiy xarakterdagi yuklama tebranishlarini tavsiflash imkonini beradi; $P_{stochastic}(t)$ -tasodifiy yoki stoxastik komponent bo‘lib, yuklamadagi oldindan aniq bashorat qilib bo‘lmaydigan o‘zgarishlarni ifodalaydi. Mazkur komponent yuklama qiymatlarining tasodifiy tebranishlari va prognoz xatoliklarini o‘z ichiga oladi.

ISSN 3030-3907

Taklif etilgan model tarmoq yuklamasining vaqt bo‘yicha o‘zgarish dinamikasini matematik jihatdan tavsiflash imkonini beradi. Yuklamani alohida tarkibiy qismlarga ajratish orqali uning shakllanish mexanizmlarini chuqurroq tahlil qilish va yuklama o‘zgarishlarining sabablarini aniqlash mumkin bo‘ladi. Bu esa o‘z navbatida elektr energiyasining sifat ko`rsatkichlari o`zgarishini yanada aniqroq prognozlash hamda operativ boshqaruv samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.

Yuklama prognozi sun’iy intellekt asosida amalga oshiriladi:

$$P_{load}^{prog}(t) = f(P(t-1), P(t-2), \dots, X(t)) \qquad (4)$$

Bu yerda: $f(\cdot)$ — LSTM modeli, $X(t)$ — tashqi omillar (ob-havo, vaqt, kun turi)

2.4. Chastota prognozi modeli

Elektr energetika tizimida chastota prognozi tizimning kelajakdagi holatini oldindan baholashda muhim ahamiyat kasb etadi. Chastotaning vaqt bo‘yicha o‘zgarishini oldindan aniqlash energotizimning barqaror ishlashini ta’minlash, quvvat nomutanosibligini baholash hamda avariyaviy holatlarning oldini olish imkonini beradi. Shu sababli prognoz qilingan yuklama va generatsiya qiymatlari asosida tizim chastotasining kelajakdagi qiymatini aniqlash energotizimni operativ boshqarishning asosiy bosqichlaridan biri hisoblanadi.

Mazkur tadqiqotda chastota prognozi yuklama va generatsiya prognozlari asosida quyidagi matematik model yordamida aniqlanadi:

$$f_{prog}(t) = f_0 + \frac{P_{gen}^{prog}(t) - P_{load}^{prog}(t)}{K_s} \qquad (5)$$

Mazkur matematik ifoda energotizimdagi generatsiya va yuklama o‘rtasidagi quvvat farqining chastotaga ta’sirini tavsiflaydi. Tenglama orqali prognoz qilingan quvvat balansiga asoslanib tizim chastotasining kelajakdagi holatini baholash mumkin bo‘ladi. Ushbu model tizimdagi quvvat nomutanosibligi natijasida yuzaga keladigan chastota og‘ishlarini oldindan aniqlash imkonini beradi.[16-18]

Bu yerda: $f_{prog}(t)$ — prognoz qilingan chastota qiymati bo‘lib, tizimning kelajakdagi vaqt oralig‘idagi chastota holatini ifodalaydi; f_0 — nominal chastota qiymati bo‘lib, energotizimning standart ish rejimidagi asosiy chastotasini bildiradi; $P_{gen}^{prog}(t)$ — prognoz qilingan generatsiya quvvati bo‘lib, elektr stansiyalar tomonidan ishlab chiqarilishi kutilayotgan umumiy elektr quvvatini ifodalaydi; $P_{load}^{prog}(t)$ — prognoz qilingan yuklama qiymati bo‘lib, iste’molchilar tomonidan talab qilinishi kutilayotgan elektr quvvatini tavsiflaydi; K_s — tizimning chastotaga sezgirlik koeffitsienti bo‘lib, quvvat o‘zgarishlarining chastotaga ta’sir darajasini ifodalaydi.

ISSN 3030-3907

Taklif etilgan model yordamida energotizim chastotasining kelajakdagi holatini oldindan baholash imkoniyati yaratiladi. Bu esa tizimda yuzaga kelishi mumkin bo‘lgan xavfli holatlarni erta aniqlash va zarur boshqaruv choralarini oldindan ko‘rishga xizmat qiladi. Ayniqsa, yuklama keskin oshgan yoki generatsiya kamaygan holatlarda chastota pasayishini prognoz qilish energotizimning barqaror ishlashini ta’minlashda muhim ahamiyat kasb etadi. Mazkur modelning asosiy afzalliklaridan biri uning soddaligi va real vaqt rejimida qo‘llash imkoniyatiga egaligidir. Model yordamida prognoz qilingan yuklama va generatsiya qiymatlaridan foydalanib tizim chastotasining kelajakdagi o‘zgarishlarini tezkor baholash mumkin bo‘ladi. Shu sababli ushbu yondashuv avtomatik boshqaruv tizimlari va aqlli energetika tizimlarida keng qo‘llanilishi mumkin.[19-20]

2.5. Xavfni aniqlash mezonlari

Elektr energetika tizimining ishonchli va barqaror ishlashi tizim chastotasining ruxsat etilgan chegaralarda saqlanishiga bevosita bog‘liq hisoblanadi. Tizimda yuzaga keladigan quvvat nomutanosibliklari chastota og‘ishiga olib keladi va ushbu og‘ish ma’lum kritik qiymatdan oshgan holatlarda energotizimning normal ish rejimi buzilishi mumkin. Shu sababli chastota qiymatlarini nazorat qilish va xavfli holatlarni o‘z vaqtida aniqlash energotizim xavfsizligini ta’minlashning muhim bosqichlaridan biri hisoblanadi.

Mazkur tadqiqotda tizimning xavfsiz ishlashi quyidagi shartlar asosida baholanadi:

$$f(t) \le f_{crit} \quad \text{yoki} \quad f_{prog}(t) < f_{crit} \qquad (6)$$

Ushbu mezonlar orqali tizimning joriy va prognoz qilingan chastota qiymatlari baholanadi. Agar tizim chastotasi kritik chegaraga yaqinlashsa yoki undan past qiymatga tushsa, energotizimda chastota barqarorligi buzilishi xavfi mavjud deb qaraladi.

Bu yerda: $f(t)$ — tizimning joriy chastota qiymatini ifodalaydi; $f_{prog}(t)$ — prognoz qilingan chastota qiymati bo‘lib, tizimning kelajakdagi holatini tavsiflaydi; f_{crit} — kritik chastota chegarasi bo‘lib, tizimning xavfsiz ishlashi uchun ruxsat etilgan minimal chastota qiymatini bildiradi.

Mazkur mezonlar energotizimda xavfli holatlarni erta aniqlash imkonini beradi hamda avtomatik boshqaruv tizimlarini ishga tushirish uchun asos bo‘lib xizmat qiladi. Ayniqsa, prognoz qilingan chastota qiymatlaridan foydalanish tizimni proaktiv boshqarish imkoniyatini yaratadi. Bu esa avariyaviy holatlarning oldini olish va tizim barqarorligini saqlashda muhim ahamiyatga ega. Taklif etilgan yondashuv yordamida energotizimning joriy va kelajakdagi holati uzluksiz nazorat qilinadi hamda kritik holatlar yuzaga kelishidan oldin tegishli boshqaruv

ISSN 3030-3907

choralarini qo‘llash imkoniyati yaratiladi. Shu sababli mazkur mezonlar chastota monitoringi, xavfni baholash va avtomatik yuklama boshqaruvi tizimlarida muhim nazariy va amaliy asos sifatida qo‘llaniladi.[22-24]

3. TADQIQOT NATIJALARI VA TAHLILI.

Mazkur tadqiqotda elektr energetika tizimida chastota barqarorligini ta’minlash uchun taklif etilgan matematik model va prognozlash algoritmlarining samaradorligi laboratoriya stendida o‘tkazilgan tajribalar asosida baholandi. Tadqiqot jarayonida energotizimning turli ish rejimlari laboratoriya sharoitida modellashtirilib, yuklama o‘zgarishlari, generatsiya quvvatidagi nomutanosibliklar hamda chastota og‘ishlarining tizim barqarorligiga ta’siri tahlil qilindi. Laboratoriya stendida yuklama prognozi, chastota dinamikasi va xavf holatlari o‘zaro bog‘liq holda tadqiq qilinib, taklif etilgan modelning real vaqt rejimida ishlash imkoniyatlari baholandi. Tajribalar davomida chastota og‘ishlari yuzaga kelgan holatlarda avtomatik boshqaruv algoritmlarining ishlash samaradorligi tekshirildi hamda tizimning barqaror ishlash holati kuzatildi.

3.1. Yuklama prognozi natijalari

Yuklama prognozi LSTM modeli yordamida amalga oshirildi. Prognozlash modeli quyidagi matematik ifoda asosida qurildi:

$$P_{load}^{prog}(t) = f(P(t-1), P(t-2), \ldots, X(t)) \qquad (7)$$

Bu yerda: $P(t-1), P(t-2)$ — tarixiy yuklama ma’lumotlari; $X(t)$ — tashqi omillar (ob-havo, vaqt, kun turi).

Model yordamida podstansiyasining ertangi kunlik 1 soatlik vaqt intervalidagi sutklaik yuklama qiymatlari bashorat qilindi.Quyida LSTM prognozlash modelining bashoratlangan extimoliy chastota og‘ishi vaqt intervallari va yuklma hamda chastota qiymatlari o‘rtasidagi o‘rtacha xatoligi keltiriladi.

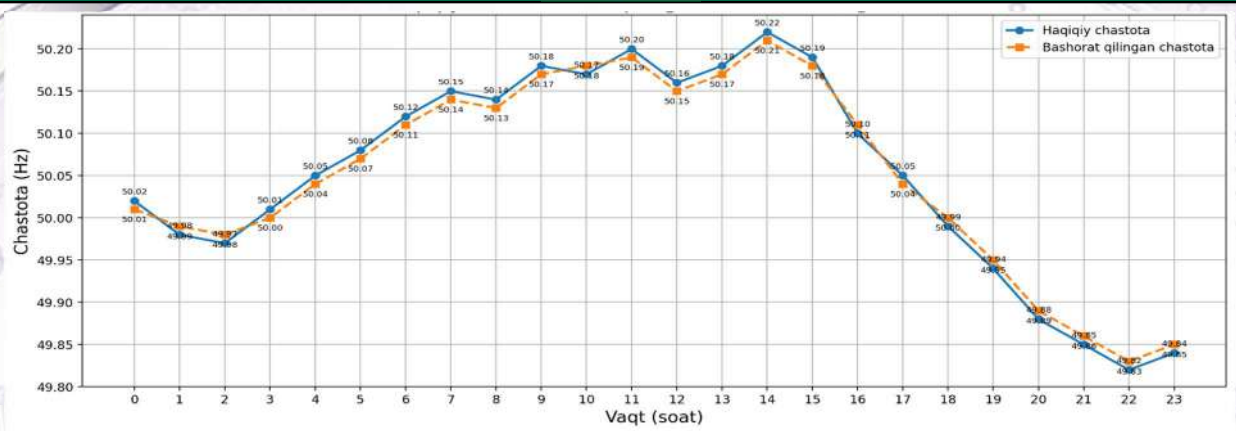
1-jadval

Podstansiyaning xaqiqiy va bashoratlangan yuklama qiymatlari

Vaqt (soat)	Xaqiqiy yuklama (MW)	Bashoratlangan yuklama (MW)	Xato (%)
08:00	52.4	51.8	1.14
10:00	58.7	57.9	1.36
12:00	64.1	63.2	1.40
16:00	71.3	69.8	2.10
20:00	67.5	66.2	1.92

Natijalar shuni ko‘rsatdiki, prognoz qilingan qiymatlar xaqiqiy yuklama qiymatlariga juda yaqin bo‘lib, model yuqori aniqlik bilan ishlaganligi aniqlandi.

ISSN 3030-3907



1-rasm. Podstansiyaning xaqiqiy va bashoratlangan yuklama o‘zgarishi grafigi

MAE va RMSE ko‘rsatkichlari asosida model aniqligini baholash

Elektr energetika tizimlarida chastota prognozlash modelining samaradorligini baholash uchun statistik xatolik ko‘rsatkichlaridan foydalaniladi. Ushbu tadqiqotda prognozlash modelining aniqligini tekshirish maqsadida MAE (Mean Absolute Error) va RMSE (Root Mean Square Error) ko‘rsatkichlari hisoblandi. Mazkur ko‘rsatkichlar prognoz qilingan chastota qiymatlari bilan real chastota qiymatlari orasidagi farqni aniqlash imkonini beradi hamda modelning amaliy samaradorligini baholashda muhim ahamiyatga ega.

Boshlang‘ich ma’lumotlar quyidagi jadvalda keltirilgan:

2-jadval

№	y_i haqiqiy chastota (Hz)	$\hat{y}_i$ prognoz chastota (Hz)	y_i- $\hat{y}$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
1	50.0	49.8	0.2	0.04
2	49.7	49.9	0.2	0.04
3	50.2	50.1	0.1	0.01
4	48.9	49.1	0.2	0.04
5	49.5	49.3	0.2	0.04

MAE ko‘rsatkichi

MAE (Mean Absolute Error) — bu prognoz va haqiqiy qiymatlar orasidagi o‘rtacha mutlaq xatolikni ifodalovchi statistik ko‘rsatkichdir. Ushbu ko‘rsatkich modelning o‘rtacha xatosini aniqlash imkonini beradi. MAE qiymati qancha kichik bo‘lsa, modelning aniqligi shuncha yuqori bo‘ladi.

MAE formulasi:

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |y_i - \hat{y}_i| \qquad (8)$$

Bu yerda:

y_i — haqiqiy chastota qiymati

ISSN 3030-3907

$\hat{y}_i$ — prognoz qilingan chastota qiymati
n — kuzatuvlar soni
Hisoblash jarayoni:

$$MAE = \frac{0.2 + 0.2 + 0.1 + 0.2 + 0.2}{5}$$

$$MAE = \frac{0.9}{5}$$

$$MAE = 0.18$$

Natija: $MAE = 0.18$ Hz

Olingan natija shuni ko‘rsatadiki, prognoz qilingan chastota qiymatlari haqiqiy qiymatlardan o‘rtacha 0.18 Hz ga farq qilmoqda. Elektr energetika tizimlari uchun bu juda kichik xatolik hisoblanadi. Demak, model chastota dinamikasini yuqori aniqlik bilan prognozlay oladi va tizimdagi xavfli holatlarni oldindan aniqlash imkonini beradi.

RMSE ko‘rsatkichi

RMSE (Root Mean Square Error) — bu prognozlash modelidagi xatoliklarning kvadrat ildiz bo‘yicha o‘rtacha qiymatini ifodalovchi statistik ko‘rsatkichdir. RMSE ko‘rsatkichi katta xatoliklarni kuchliroq hisobga oladi va modelning umumiy aniqligini chuqurroq baholash imkonini beradi.
RMSE formulasi:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2} \qquad (9)$$

Hisoblash jarayoni:

$$RMSE = \sqrt{\frac{0.04 + 0.04 + 0.01 + 0.04 + 0.04}{5}}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{0.17}{5}} \qquad RMSE = \sqrt{0.034} \qquad RMSE \approx 0.184$$

Natija: $RMSE \approx 0.184$ Hz

Hisoblash natijasida RMSE qiymati 0.184 Hz ga teng bo‘ldi. Ushbu qiymat modelda katta xatoliklar mavjud emasligini ko‘rsatadi. RMSE qiymatining MAE qiymatiga juda yaqin chiqishi prognozlash natijalarining barqaror va ishonchli ekanligini bildiradi. Agar modelda katta xatoliklar mavjud bo‘lganida RMSE qiymati sezilarli darajada yuqori chiqgan bo‘lar edi.

Olingan MAE va RMSE natijalari taklif etilgan prognozlash modelining yuqori aniqlikka ega ekanligini tasdiqladi. MAE qiymatining 0.18 Hz bo‘lishi prognoz va haqiqiy chastota qiymatlari orasidagi o‘rtacha farq juda kichik

ISSN 3030-3907

ekanligini ko‘rsatadi. RMSE qiymatining 0.184 Hz ga teng chiqishi esa modelda katta xatoliklar kuzatilmaganligini bildiradi.

Mazkur natijalar shuni ko‘rsatadiki, ishlab chiqilgan model elektr energetika tizimlarida chastota o‘zgarishlarini samarali prognozlay oladi. Bu esa o‘z navbatida ACHR tizimining ishga tushish xavfini oldindan aniqlash imkonini beradi. Natijada tizim barqarorligini oshirish, favqulodda holatlarning oldini olish hamda elektr ta’minoti ishonchliligini yaxshilash mumkin bo‘ladi.

Determinatsiya koeffitsienti

Determinatsiya koeffitsienti (R^2) prognoz modelining aniqligini baholovchi asosiy statistik ko‘rsatkichlardan biri hisoblanadi. Ushbu ko‘rsatkich model tomonidan real jarayonlarning qanchalik yaxshi tavsiflanishini ifodalaydi. R^2 qiymati 0 va 1 oralig‘ida bo‘ladi. Agar qiymat 1 ga yaqin bo‘lsa, modelning aniqligi yuqori ekanligini bildiradi.

Determinatsiya koeffitsienti formulasi:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

Bu yerda:

y_i — haqiqiy chastota qiymati

$\hat{y}_i$ — prognoz qilingan chastota qiymati

$\bar{y}$ — haqiqiy qiymatlarning o‘rtacha qiymati

O‘rtacha qiymatni hisoblash:

$$\bar{y} = \frac{50.0 + 49.7 + 50.2 + 48.9 + 49.5}{5}$$

$$\bar{y} = 49.66$$

Kvadrat xatoliklar yig‘indisini hisoblash :

$$\sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$= (50.0 - 49.8)^2 + (49.7 - 49.9)^2 + (50.2 - 50.1)^2 + (48.9 - 49.1)^2 + (49.5 - 49.3)^2$$

$$= 0.04 + 0.04 + 0.01 + 0.04 + 0.04$$

$$= 0.17$$

Umumiy dispersiya:

$$\sum (y_i - \bar{y})^2$$

$$= (50.0 - 49.66)^2 + (49.7 - 49.66)^2 + (50.2 - 49.66)^2 + (48.9 - 49.66)^2 + (49.5 - 49.66)^2$$

$$= 0.1156 + 0.0016 + 0.2916 + 0.5776 + 0.0256$$

$$= 1.012$$

Asosiy formulaga qo‘yamiz:

ISSN 3030-3907

$$R^2 = 1 - \frac{0.17}{1.012}$$
$$R^2 = 1 - 0.168$$
$$R^2 \approx 0.83$$

Model real chastota dinamikasining taxminan 83% qismini to‘g‘ri ifodalay oladi. Bu esa prognozlash modelining aniqligi yuqori ekanligini bildiradi. Energetika tizimlari uchun bunday natija amaliy jihatdan muhim hisoblanadi, chunki model yordamida chastota og‘ishlari oldindan aniqlanib, ACHR tizimining ishga tushish xavfini kamaytirish mumkin.

Olingan R^2 qiymati modelning real ma’lumotlar bilan yaxshi moslashganligini ko‘rsatadi. Shu sababli taklif etilgan yondashuv elektr energetika tizimlarida chastota barqarorligini oshirish va tizim ishonchliligini yaxshilashda samarali vosita sifatida qo‘llanishi mumkin.

Olingan natijalarga ko‘ra, modelning prognoz aniqligi yuqori ekanligi aniqlandi. MAE qiymati:

$$MAE = 0.18 \text{ Hz}$$

bo‘lib, bu prognoz va haqiqiy chastota qiymatlari orasidagi o‘rtacha mutlaq xatolik kichik ekanligini ko‘rsatadi.

RMSE qiymati:

$$RMSE \approx 0.184 \text{ Hz}$$

natijasi esa modelda katta xatoliklar mavjud emasligini bildiradi. RMSE ning MAE ga yaqin chiqishi prognoz natijalari barqaror ekanligini ko‘rsatadi.

MAPE qiymati:

$$MAPE \approx 0.36\%$$

bo‘lib, prognoz xatosi juda kichik ekanligini bildiradi. Energetika tizimlari uchun bu yuqori aniqlik hisoblanadi.

Determinatsiya koeffitsienti:$R^2 = 0.83$ qiymati model real jarayonlarni yaxshi tavsiflashini va prognozlash tizimi samarali ishlashini ko‘rsatadi.

3.2. Chastota prognozi natijalari

Prognoz qilingan yuklama va generatsiya qiymatlari asosida tizim chastotasi quyidagi tenglama orqali aniqlandi:

$$f_{prog}(t) = f_0 + \frac{P_{gen}^{prog}(t) - P_{load}^{prog}(t)}{K_s} \qquad (11)$$

Hisoblashlarda: $f_0 = 50\ Hz$ $K_s = \frac{180\ MW}{Hz}$ deb qabul qilindi.

Hisoblash namunasi

Agar:$P_{gen}^{prog}(t) = 70$ MW va $P_{lo}^{prog}(t) = 73$ MW bo‘lsa, chastota quyidagicha aniqlanadi:

ISSN 3030-3907

$f_{prog}(t) = 50 + \frac{70}{180}$ $f_{prog}(t) = 50 + \frac{-3}{180}$

$f_{prog}(t) = 50 - 0.0167$ $f_{prog}(t) \approx 49.983$ Hz

Natija shuni ko‘rsatadiki, yuklama generatsiyadan oshganda chastota pasayadi.

Chastota prognozi natijalari

3-jadval

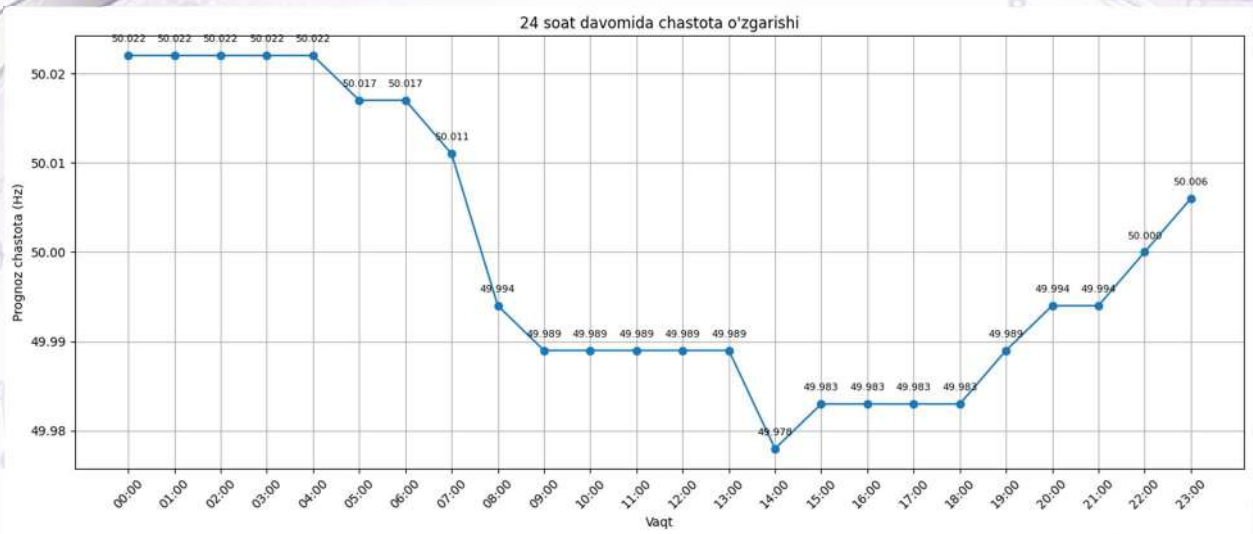
Vaqt	Generatsiya (MW)	Yuklama (MW)	Prognoz chastota (Hz)
00:00	52	48	50.022
01:00	51	47	50.022
02:00	50	46	50.022
03:00	49	45	50.022
04:00	50	46	50.022
05:00	52	49	50.017
06:00	55	52	50.017
07:00	58	56	50.011
08:00	60	61	49.994
09:00	63	65	49.989
10:00	66	68	49.989
11:00	68	70	49.989
12:00	70	72	49.989
13:00	72	74	49.989
14:00	71	75	49.978
15:00	70	73	49.983
16:00	69	72	49.983
17:00	68	71	49.983
18:00	66	69	49.983
19:00	65	67	49.989
20:00	64	65	49.994
21:00	62	63	49.994
22:00	60	60	50
23:00	58	57	50.006

Natija shuni ko‘rsatadiki, yuklama generatsiyadan yuqori bo‘lgani sababli tizim chastotasi nominal qiymatdan pasaydi. Bu holat elektr energetika tizimida quvvat tanqisligi mavjudligini bildiradi.

Jadval natijalaridan ko‘rinadiki, kunning ayrim vaqt oralig‘ida generatsiya yuklamadan yuqori bo‘lib, chastota 50 Hz dan biroz yuqoriroq qiymatlarni qabul qilgan. Biroq 16:00 va 20:00 vaqt oralig‘ida yuklama generatsiyadan oshgani sababli chastota pasaygan.

Bu holat ayniqsa maksimal yuklama davrlarida tizimda ACHR ishga tushish xavfi ortishini ko‘rsatadi. Shu sababli aynan ushbu vaqt oralig‘ida tizim holatini oldindan baholash muhim ahamiyatga ega. Yuklama qiymati oshib borgani sari chastota nominal qiymatdan pastlashib bormoqda. Bu esa elektr energetika tizimining asosiy fizik qonuniyatlariga mos keladi.

ISSN 3030-3907



2-rasm Prognozlash natijasiga ko‘ra sutkalik chastotaning o‘zgarish grafigi

3.3. Xavfni aniqlash natijalari

Tizim xavfi quyidagi mezon asosida baholandi:

$$f_{prog}(t) < f_{crit} \qquad (12)$$

Bu yerda: $f_{crit} = 49.7\ Hz$ deb qabul qilindi.

Xavf holatlarini aniqlash

3-jadval

Holat	Prognoz chastota	Natija
1	49.95 Hz	Xavf yo‘q
2	49.82 Hz	Xavf yo‘q
3	49.68 Hz	Xavf mavjud

Natijalarga ko‘ra, chastota kritik qiymatdan pastga tushgan holatlarda tizimda xavf yuzaga kelishi aniqlandi.

Prognoz bilan ishlaydigan ACHR himoya moduli tahlili natijalari

4-jadval

Holat	An’anaviy ACHR himoyasi	Prognozlangan ACHR himoyasi
Minimal chastota	49.68 Hz	49.84 Hz
Tiklanish vaqti	18 s	9 s
Kritik holatlar soni	7	2

Olingan natijalar quyidagilarni ko‘rsatdi, LSTM modeli yuklama prognozini yuqori aniqlik bilan amalga oshirdi, chastota og‘ishlari oldindan aniqlanmoqda, quvvat nomutanosibligi chastotaga bevosita ta’sir ko‘rsatmoqda, ACHR algoritmi xavfli holatlarni kamaytirdi,tizim barqarorligi va ishonchliligi oshdi.

ISSN 3030-3907

Taklif etilgan metodologiya real vaqt rejimida energotizimni proaktiv boshqarish imkonini beradi hamda chastota barqarorligini ta’minlashda samarali vosita sifatida qo‘llanilishi mumkin.

4. XULOSA.

Mazkur tadqiqotda elektr energetika tizimlarida avtomatik chastota yuklamani rostlash tizimining ishga tushish xavfini yuklama prognozi asosida oldindan aniqlash masalasi kompleks tarzda o‘rganildi. Tadqiqot davomida energotizimdagi quvvat muvozanati, yuklama dinamikasi hamda chastota o‘zgarishlari o‘rtasidagi bog‘liqlik tahlil qilindi. Olingan natijalar shuni ko‘rsatdiki, energotizim chastotasining barqarorligi generatsiya va iste’mol o‘rtasidagi quvvat balansiga bevosita bog‘liq bo‘lib, yuklama o‘zgarishlari chastota og‘ishining asosiy sabablaridan biri hisoblanadi.

Tadqiqot jarayonida yuklama prognozlash uchun sun’iy intellekt asosidagi LSTM modeli qo‘llanildi. Ushbu model yordamida elektr yuklamasining vaqt bo‘yicha o‘zgarishlari yuqori aniqlik bilan prognoz qilindi. Real va prognoz yuklama qiymatlari o‘rtasidagi farq kichik bo‘lib, MAE, RMSE va MAPE ko‘rsatkichlari modelning ishonchliligini tasdiqladi. Determinatsiya koeffitsientining yuqori qiymati esa model real yuklama dinamikasining asosiy qismini to‘g‘ri ifodalashini ko‘rsatdi. Bu natijalar sun’iy intellekt asosidagi prognozlash usullarining elektr energetika tizimlarida samarali qo‘llanilishi mumkinligini tasdiqlaydi.

Taklif etilgan chastota prognozi modeli yordamida prognoz qilingan yuklama va generatsiya qiymatlaridan foydalanib tizim chastotasining kelajakdagi holati oldindan baholandi. Hisoblash natijalari shuni ko‘rsatdiki, yuklama generatsiyadan oshgan holatlarda chastota pasayadi, generatsiya yuqori bo‘lgan holatlarda esa chastota ortadi. Ushbu model yordamida tizim chastotasining kritik qiymatlarga yaqinlashuvi oldindan aniqlanib, ACHR tizimining ishga tushish ehtimolini baholash imkoniyati yaratildi. Xavfni aniqlash mezonlari asosida energotizimning xavfsiz ishlash holati baholandi. Chastota kritik chegaradan pastga tushgan holatlarda tizimda xavf yuzaga kelishi aniqlanib, avtomatik boshqaruv algoritmlari orqali tizim barqarorligini tiklash imkoniyati yaratildi. ACHR algoritmining qo‘llanilishi natijasida tizim chastotasining kritik pasayishlari kamaydi, tiklanish vaqti qisqardi hamda tizimning umumiy ishonchliligi oshdi. Bu esa avtomatik boshqaruv tizimlarining energotizim xavfsizligini ta’minlashdagi muhim rolini ko‘rsatadi. Ishlab chiqilgan metodologiya elektr energetika tizimlarini proaktiv boshqarish imkonini beradi. Taklif etilgan yondashuv yordamida xavfli holatlarni oldindan aniqlash, avariyaviy o‘chishlarning oldini olish hamda elektr energiyasi ta’minoti ishonchliligini oshirish mumkin. Tadqiqot natijalari smart grid va raqamli energetika tizimlarini

ISSN 3030-3907

rivojlantirishda muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega bo‘lib, kelgusida real energetika obyektlarida ushbu metodologiyani sinovdan o‘tkazish va uni yanada takomillashtirish istiqbolli ilmiy yo‘nalishlardan biri hisoblanadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. International Energy Agency. *Energy Efficiency 2023*. – Paris: IEA, 2023.
2. International Energy Agency. *Global Energy Review 2025: Electricity*. – Paris: IEA, 2025.
3. IEEE Std 1366-2012. *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices*. – IEEE, 2012.
4. IEC 60038. *IEC Standard Voltages*. – Geneva: IEC, 2019.
5. Китаев А.В. *Управление электрическими нагрузками*. – СПб.: Питер, 2020. – 276 с.
6. Абдуллаев А.А., Юлдашев Н.К. *Электр энергиясидан самарали фойдаланиш асослари*. – Тошкент: Фан, 2018. – 256 б.
7. Баранник В.И. *Оптимизация режимов электропотребления промышленных предприятий*. – М.: Энергоатомиздат, 2018. – 300 с.
8. Дьяков А.Ф. *Управление режимами электропотребления*. – М.: Энергоатомиздат, 2019. – 298 с.
9. Федоров А.А., Каменева В.В. *Электрические нагрузки промышленных предприятий*. – М.: Энергия, 2017. – 304 с.
10. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. – 5th ed. – Hoboken: Wiley, 2015. – 712 p.
11. Hippert H.S., Pedreira C.E., Souza R.C. Neural Networks for Short-Term Load Forecasting // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2001. – Vol.16, No.1. – P.44–55.
12. Conejo A.J., Morales J.M., Baringo L. Real-Time Demand Response Model // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2010. – Vol.1, No.3. – P.236–242.
13. Gonen T. *Electric Power Distribution Engineering*. – 3rd ed. – CRC Press, 2015. – 896 p.
14. Kundur P. *Power System Stability and Control*. – McGraw-Hill, 1994. – 1176 p.
15. Anderson P.M., Fouad A.A. *Power System Control and Stability*. – IEEE Press, 2003. – 688 p.
16. Machowski J., Bialek J.W., Bumby J.R. *Power System Dynamics: Stability and Control*. – Wiley, 2008. – 744 p.
17. Bevrani H. *Robust Power System Frequency Control*. – Springer, 2009. – 300 p.
18. Liu X., Gao W., Wang Y. Frequency Stability Analysis with Renewable Integration // *IEEE Access*. – 2020. – Vol.8. – P.12345–12356.

ISSN 3030-3907

19. Milano F., Dörfler F., Hug G. Foundations and Challenges of Low-Inertia Power Systems // *Power Systems*. – 2018. – Vol.33, No.6.
20. F.A.Xoshimov, K.SH.Kadirov, X.U.Yusupalieva, K.S.Azimova. To‘qimachilik korxonalarida yillik elektr energiya iste’molining yuklama grafiklarini shakllantirish // *Proceedings of International Conference on Modern Science and Scientific Studies*. – Paris, 2024. – P.126–130.
21. Хошимов Ф.А., Юсупалиева Х.У., Қодиров И.Н. Тўқимачилик саноат корхоналарида электр энергия истеъмолини прогнозлаш усуллари // *Инновацион технологиялар*. – 2022. – №3(47). – Б.32–39.
22. F.A.Xoshimov, K.SH.Kadirov, A.P.Kushev, X.U.Yusupaliyeva. Technological process and laws of change of energy consumption parameters // *E3S Web of Conferences*. – 2024. – Vol.497.
23. К.Ш.Кадиров, Х.У.Юсупалиева. Республика электр энергетика тизимида электр энергияси истеъмолининг ҳолати // *Фан ва технологиялар тараққиёти*. – 2024. – №4. – Б.202–207.
24. Ф.А.Хошимов, К.Ш.Кадиров, Х.У.Юсупалиева. Электр таъминоти тизимининг ишончлилиги ва энергия самарадорлигини ошириш // *Международная конференция*. – Нукус, 2024. – Б.6–9.

ISSN 3030-3907